

# 用动力学方法检测水果坚实度的研究进展

焦群英 王书茂

中国农业大学工程基础科学部, 北京 100083

**摘要** 近年来, 许多发达国家对水果坚实度进行了广泛地研究, 探索坚实度检验的新方法. 水果坚实度是表征水果成熟程度和品质的重要物理指标, 对水果的收获、储藏和销售均具有重要意义. 本文从力学的角度综述了国外这方面的研究工作, 着重介绍了用动力学方法进行水果无损坚实度估计的原理和水果固有频率与坚实度的关系.

**关键词** 水果坚实度, 水果固有频率, 振动响应, 材料特性

## 1 引言

水果坚实度 (Firmness) 或松脆性 (Crispness) 是水果成熟状态和品质的一个重要指标. 水果生长和存储过程中, 细胞间的结合力变小, 反映细胞间结合力变化的物理指标是坚实度.

水果成熟状态可由化学成分, 如含糖量的变化<sup>[1,2]</sup>, 外观颜色和几何形状的改变, 物理特性的改变等参数表征<sup>[3~6]</sup>. 化学成分分析需要取样测试, 过程复杂并且是损伤性的, 不可能逐个进行检测. 外观、颜色测量量化困难, 并随生长的地域和光照条件的不同而异. 因此, 坚实度成为一种常用的、客观的、物理检测的重要方法. 目前坚实度检查的常用方法是 M-T 戳穿试验方法 (Magness-Taylor puncture test)<sup>[7]</sup>. M-T 戳穿试验方法是用一定直径的钢制压头, 按一定的压缩速度对水果进行压缩试验, 同时测量压缩力, 压缩力的最大值称为其坚实度. M-T 戳穿试验简单易行, 因此成为常用的水果坚实度的检测方法. 但是, M-T 戳穿试验也是损伤性的, 不可能逐个检验, 大样本的试验也不现实. 另外, 水果不同位置 M-T 试验的结果有较大的差异.

为了为消费者提供高质量的水果, 水果的种植、储存和销售者都需要一种方便、可靠的无损坚实度的检验技术, 取代目前的 M-T 试验, 以便对水果随时检测.

目前无损水果品质的检验方法主要有核磁共振、超声、计算机图像的颜色识别<sup>[8,9]</sup>和动力学方法. 本文主要对国外最近比较活跃的根据动力学方法在线坚实度检验的有关研究原理进行评述.

下列几方面的原因使水果在线无损坚实度检验方法得以广泛的重视.

- (1) 水果生长中成熟度的监测和分析, 决定合适的收获期.
- (2) 水果收获过程按其成熟度分级, 以便存储.

收稿日期: 1998-10-26, 修回日期: 1999-02-08

(3) 水果存储、保鲜存储期的确定. 水果在存储过程中由于生物性质变化, 成熟度改变, 因此需要定期测试确定其成熟程度和保鲜存储期, 以便按水果成熟状态分类使用, 向市场提供成熟度一致的高质量的水果, 将无法供应市场的水果改作他用. 减少存储损失, 充分利用农产品、提高水果商品的有效供给, 这对高价值的水果尤为重要.

水果无损坚实度估计研究的目的是寻找一种可能成为在线检验的方法和设备. 研究的主要内容是成熟度与坚实度的关系、成熟度与物理特性的关系、成熟过程动力学参数, 如固有频率的变化情况等, 寻找与成熟度相关的较好的物理量和这些物理量的测试原理和方法.

## 2 水果的本构关系的研究<sup>[10,11]</sup>

水果的本构关系和组织材料特性无论对理论分析或试验研究都是重要的. 水果坚实度无损测量中, 水果组织的杨氏模量是一个重要的基本参数. 由于水果组织材料的复杂性, 测量结果受其形状、大小、密度等因素影响. 另外测量传感器和施加力的位置和方向也会影响其测量结果. Chen 等<sup>[12]</sup>在研究苹果动态特性时, 将水果视为各向同性的线性材料, 尽管他们意识到这是对实际水果的简化, 但由于缺乏有关水果组织材料的基本信息, 所以只好采用简化的模型.

在 70 年代, 有人注意到水果被切割的方法、位置及方向影响其物理参数的估计<sup>[13]</sup>. 文献 [7] 对苹果的材料性能做了详细地研究, 他们将苹果分成上、中、底三个高度; 形成东、西、南(受光照一侧)、北四个方位; 考虑径向、切向和垂直三个方向, 对这些参数组合下的试样进行了压缩试验. 试件按美国 ASAE368.1 标准, 取直径为 12.7mm, 长 12.0mm 果肉, 加载速度为 25.4mm/min. 试验中测量了试样的力-变形曲线, 由此得到试样的应力、应变和失效时的能量及杨氏模量, 杨氏模量取失效应力 50% 处力-变形曲线的斜率. 试验数值表明水果组织的杨氏模量径向最大, 切向最小, 底部的杨氏模量比中部和上部大. 试验结果还发现苹果组织的材料性能沿圆周方向分布比较一致, 忽略其不均匀性带来误差不大; 但苹果外层和内层材料性能相差较大, 当苹果比较成熟时内外层材料性能差异变小. 总之苹果的材料特性显示出了时变和各向异性的特征. Chappell 等<sup>[14]</sup>和 Hammerle<sup>[15]</sup>研究了其他水果的粘弹性特性, 他们发现甜土豆的泊松比随时间增加而增加. 这些成果证实了水果组织的时变特性<sup>[16]</sup>.

Chen 等<sup>[12]</sup>在本构关系研究中发现甜瓜各层之间动刚度差异很大, 与静刚度差异更大. 因此, 他们建议在进行有限元分析时应该使用动刚度而不是静刚度.

## 3 水果坚实度检测方法

国外研究者探讨了多种基于动力学原理的水果坚实度检测的方法, 如机械冲击产生的声频信号 (Sonic)<sup>[17~21]</sup>、机械冲击响应的频率分析和水果冲击力的方法<sup>[22~31]</sup>. 我们将其研究分为两类: 一类是冲击力检测法, 另一类是振动频率分析. 现分类述评.

### 3.1 利用冲击力检测水果坚实度的方法

利用冲击力检测水果坚实度的力学原理是弹性球体与刚性平面的跌落冲击问题. 冲击力与弹性球 (即水果) 的质量、几何尺寸、材料杨氏模量等参数有关. 研究的核心是当得到冲击力后如何估计或计算出材料的杨氏模量, 并与成熟度联系起来. Franke 等人<sup>[32]</sup>提出了一种非线性的球体与平板冲击的力学模型, 并通过最小二乘法拟合出球体的刚度. Perry 等<sup>[33]</sup>开发了一种记录梨、桃等水果力与变形的试验装置. 这种方法需要抓取水果, 并在水果表面安装传感器,

所以用于自动在线分级比较困难。为了克服这些困难, Baerdemaeker 等<sup>[34]</sup> 设计了测量水果跌落在刚性平板的冲击力的装置, 利用冲击力的特征预测水果的坚实度。他们对冲击力信号进行傅立叶变换, 他们的研究发现未成熟的坚硬水果冲击力含高频频率成份较多。Rohrbach<sup>[35]</sup> 利用冲击力的时域特征研究了 Blueberry 的坚实度。Delwiche<sup>[36]</sup> 研究了桃子杨氏模量与冲击力时域和频域特征量的相关性。Nahir<sup>[37]</sup> 和 Stephenson<sup>[38]</sup> 研究了西红柿的冲击力时域特征并用于西红柿坚实度分级。他们开发了一种传送带, 将西红柿从 7cm 高度落在力传感器上, 根据冲击力估计西红柿的坚实度, 这种方法可将西红柿分成三个不同等级, 据文章称其分离结果可以接受。Delwiche<sup>[39]</sup> 利用铁摩辛柯的弹性理论建立了弹性球与平面冲击的位移与力的数学模型, 并将数值模拟结果与实际测量结果进行了比较, 他们的研究表明, 冲击速度对结果的影响很大, 因此自动水果分级要求将冲击速度控制为一常数。为了更便于实际应用, 他们还设计了六阶切比雪带通滤波器, 以替代傅立叶变换, 经这种滤波器后的冲击力峰值可以用作为坚实度的指数。

### 3.2 检测水果坚实度的振动频率分析法

越来越多的研究者建议利用水果振动的固有频率检测其坚实度。尽管他们测量方法和技术不完全相同, 但其原理是一致的。

Cooke<sup>[40]</sup> 等建立了水果简化为线弹性球体的动力学模型, 并通过理论分析得到了各向同性的线弹性球状水果, 固有频率与其材料杨氏模量  $E$  的关系为

$$E = \left[ \frac{\rho(6\pi^2)^{2/3} 2(1+\nu)}{\Omega^2} \right] f^2 m^{2/3}$$

其中  $\rho$  为水果密度,  $\nu$  为泊松比,  $m$  为质量,  $\Omega$  为规一化的频率,  $f$  为其固有频率。

经测量得到固有频率  $f$  后, 由上式可以估算出水果的杨氏模量, 从而确定其坚实度, 这就是用振动固有频率检测水果坚实度的基本原理。

Armstrong<sup>[41]</sup> 等用冲击振动产生的噪声和振动信号分别研究了苹果和桃子的坚实度。他们用直径 20mm 的蜡丸冲击水果, 通过传声器测量由冲击引起的声压衰减曲线, 然后对测得的声压信号进行 FFT 频谱分析, 得出固有频率。将测得的杨氏模量与试样压缩试验得到的杨氏模量和 M-T 坚实度试验结果进行对比, 结果表明这两种方法得到的杨氏模量相关性较好, 相关系数均在 0.75 以上, 而与 M-T 试验结果相关性较差, 相关系数仅为 0.27。在研究桃子的坚实度时, Armstrong<sup>[42]</sup> 对其振动测量方法进行了改进, 他设计了压电陶瓷膜作为振动传感器, 压电陶瓷膜放在桃子下面感受由于冲击引起的桃子的振动信号。他的这次研究数据表明, 用固有频率决定桃子的坚实度与 M-T 试验结果相关性仍不好, 但文章称这种方法仍有可能将特别软的桃子挑选出来。

Farabee<sup>[43]</sup> 等也用传声器测量由于冲击引起桃子振动产生的声压信号, 同样将声压信号进行频谱分析, 不同的是他们将声压频谱分为 7 个频带宽, 记录每一频带内的幅值, 然后对 M-T 试验数据与频带内幅值进行多参数回归分析。回归分析表明, 如将水果质量视为一变量参与回归, 其相关系数将会大大改善。相关不太高的原因之一是因为 M-T 试验结果随测点在桃子上的位置而变化。Shmulevich<sup>[44]</sup> 等用压电薄膜作为传感器研究了苹果的固有频率与坚实度的关系, 他们的目的是要开发一种能满足实际水果在线分级要求 (达到每秒 5~10 个) 的技术, 他们指出, 期望无损坚实度与 M-T 试验结果有良好相关是不现实的, 因为 M-T 试验结果测量的是水果组织材料压缩和剪切共同引起的破坏强度。因此, M-T 试验结果受压缩和剪切弹性模量的共同影响, 而无损振动固有频率仅与压缩弹性模量有关。

Finney<sup>[45]</sup> 用强迫振动的方法研究了苹果、梨、桃的杨氏模量与水果生长期的关系。Abbott 等<sup>[46,47]</sup> 对悬挂在树枝上的苹果进行了振动试验，他们提出了坚实度指数的名称，并建议用  $S = mf_2^2$  表示苹果的坚实度指数。其中  $m$  为苹果质量、 $f_2$  为第二固有频率。Cooke 等通过理论分析认为坚实度指数应为  $S = 2m/3f_2^2$ 。Van Woensel 等对存储苹果定期进行 0Hz~600Hz 宽带随机激励，对用压电晶体传感器和加速度所测量的信号进行频谱分析，其结果表明在存储期内坚实度指数  $S = 2m/3f_2^2$  有明显变化。

Abbott 等<sup>[48]</sup> 对苹果的坚实度作了系统深入的工作。他们对美国的两个主要苹果品种：Delicious 和 Golden Delicious 用三种方法（固有频率，M-T 试验和苹果组织的压缩试验）测量其坚实度，并进行了对比。苹果组织的试样是在苹果直径最大处沿向阳面及其对面取径向果肉，试样直径 15mm，并将接近表皮的 2.5mm 除去，试样高度 10mm。然后将试样在万能试验机上进行压缩试验，记录力和位移曲线，从这条曲线得到三个参数：最大  $F_{max}$ ，功（力 - 变形曲线面积）和压缩变形为原来的 5% 时的斜率。

M-T 试验是用直径为 11.1mm 的压头，压缩速度 25.4mm/min，压缩深度 7.9mm，两次压缩最大力的平均值为 M-T 的结果。振动试验是在振动台上进行，振动台输入一个脉冲  $\sin(t)/t$  信号，用加速度计测量苹果的脉冲响应，作 FFT 变换得到响应的自动率谱。为了减少随机误差，采用多次平均技术，并计算自动率谱对频率的二阶导数，以突出自动率谱的峰值和区分重叠的峰值频率。他们的试验表明：一阶固有频率在 480Hz 左右，二阶共振频率在 850Hz 左右。得到二阶和三阶共振频率  $f_2, f_3$ ，利用两种方法计算苹果的刚度系数，即： $mf_2^2$  和  $mf_3^2$ 。

他们的研究表明对各种试验品种固有频率、M-T 坚实度和组织的压缩数据在 0 和 4 个月存储期内均在减少。固有频率与 M-T 结果和组织压缩结果明显相关。表 1 为固有频率的测量结果。

表 1 固有频率平均值

品种	数量	存储期 (月)	二阶固有频率 (Hz)	三阶固有频率 (Hz)
Golden Delicious	256	0	1007	1498
	256	4	885	1311
Triple Red delicious	256	0	1032	1546
	256	4	1031	1520
Ace Red Delicious	256	0	1023	1535
	256	4	825	1285

他们分别研究了坚实度指数与压缩试验在 5% 处斜率的相关；坚实度指数与压缩最大力  $F_{max}$  相关；坚实度指数与 M-T 试验相关。比较的结果为坚实度指数与压缩试验在 5% 处斜率的相关在三者中最高。其原因是固有频率与几何尺寸、密度有比例关系，在坚实度指数里面用质量包含了这些关系。而用  $f_2, f_3$  计算的坚实度指数相关性很好，两者区别不大，因此可以用坚实度指数作为苹果坚实度的非损伤检验指数。

Louis<sup>[49]</sup> 等研究了苹果成熟过程中固有频率、M-T 结果的变化及苹果皮对固有频率的影响。他们将苹果在室温 (22°C) 下保存，连续观察测试 60d 固有频率的变化和 M-T 结果的变化。他们的研究表明，固有频率随存储期明显变小。固有频率分散度小于 M-T 试验的分散度。他们进一步的研究表明，固有频率的结果与测量位置无关，它反映是苹果整体性参数，而 M-T 结果与测验位置关系很大，这是造成其结果分散性大的主要原因。

Abbott<sup>[50]</sup> 等用液压振动台在 40Hz~440Hz 范围内快速扫描测量猕猴桃 (Kiwifruit) 的振动响应加速度的自谱，并确定其固有频率。由于成熟和未成熟猕猴桃的颜色相差不大，只能用坚

实度判断其成熟度。

笔者<sup>[51]</sup>、何东健等<sup>[52]</sup>用冲击振动方法试验研究了西瓜的固有频率与含糖量的关系。他们的研究都表明，西瓜的固有频率随成熟度的增加而降低，坚实度指数与含糖量有明显的相关关系。

#### 4 数值计算方法

Rosenfeld 等<sup>[53,54]</sup>利用边界元方法计算了粘弹性水果模型在底部激励时的振动响应，数值模拟出第一阶和第二阶振型，其数值模拟结果与 Kimmel<sup>[55]</sup>等试验结果吻合较好。他们的数值计算表明当已知质量和固有频率时，可以用坚实度指数对水果进行分类。

Chen<sup>[56]</sup>用试验模态分析和有限元方法研究了菠萝的动态特性及其与坚实度的关系。在试验模态分析中，用锤击沿径向的 40 个点，分别得到其频率响应函数。分析频率范围 0 Hz~800 Hz，然后用曲线拟合得到其固有频率和振型。在有限元分析中，他们将菠萝简化为由中心、肉和皮三种不同材料的各向同性、线弹性圆柱体，尽管他们知道用线弹性各向同性的材料性质是对水果本构关系的简化，但由于缺少这类材料本构关系的资料，另外受软硬件的限制。他们共用了 168 个三维各向同性单元，183 个节点，549 个自由度，使用 ANSYS4.4A 软件计算出固有频率和振型。研究中发现计算出的一阶振型为扭转振型，二阶振型为球形振型。由于试验模态分析中测振传感器沿径向安装，所以无法感受扭转振型。他们的研究还表明，菠萝的杨氏模量  $E$  与质量和固有频率关系可以表示为

$$E \approx 2m \cdot f_0^2$$

这与 Cooke 等人的理论分析结果一致。

他们还对比菠萝中心、肉和皮对固有频率和振型的影响灵敏度进行了数值模拟计算，计算结果表明振型模式对上述变化不敏感。扭转共振的频率对菠萝皮的变化最敏感，而球形共振频率对果肉的坚实度最敏感。因此，为了估计水果坚实度，用球形共振频率比扭转共振频率好。最后他们对固有频率与含糖量和皮的叶绿素含量等化学成分进行了对比，其结果表明共振频率与叶绿素的相关系数为 0.47，与含糖量的相关系数为 -0.32。其结论是化学分析和物理分析每种方法给出了品质的一方面指标，没明显相关关系。

Chen 等人<sup>[57]</sup>还用同样的简化方法对苹果的动态特性进行了有限元分析计算，得到了振型和固有频率等动态参数，其结果与 Abbott 等人的试验结果比较一致。Chen<sup>[12]</sup>等对甜瓜本构关系和动力学性能进行了较系统的研究。他们将甜瓜简化为中空球体，将甜瓜组织分为内、中、外、皮四层。对每一层组织材料，用振动台激励的方法得到其杨氏模量。然后将甜瓜分为四层，192 个三维单元，用 ANSYS4.4A 计算固有频率和振型。由于受硬件限制每一节点仅考虑了三个方向移动，略去了转角位移。在研究中，他们通过改变组织杨氏模量模拟了在甜瓜皮下有软化点 (watercore) 时固有频率和振型的变化。数值计算表明局部的软化点引起的固有频率变化较小，在计算的误差范围内。因此，用固有频率变化确定甜瓜的微小缺陷是不可能的。数值计算结果显示甜瓜的最低阶振型是使球体成椭球的振型 (Oblate prolate mode)，并且由于结构的非严格对称，存在多个固有频率相近的同类振型。该振型特点是球体上有两条节点线，第二类球振型是径向振动出现反向，并且还计算出扭振、膨胀和缩小 (Breathing mode)。根据数值模拟的结果，他们将动态杨氏模量  $E_d$  与固有频率  $f$ ，质量  $m$ ，体积  $V$  的关系表示为

$$E_d \approx f^2 m V^{-1/3} \quad \text{或} \quad E_d \approx f^2 m^{2/3} p^{1/3}$$

上式表明, 目前广泛应用的  $E_d \approx f^2 m^{2/3}$  只是在假设其密度为常数时成立.

## 5 结束语

从上面的综述可以看出, 水果坚实度的研究对水果按成熟度分级, 水果存储过程的检测有实用价值. 但目前的研究成果距实用仍有较大的差距, 有些基本的理论问题尚不清楚. 从发展趋势来看, 无损检验方法将会替代 M-T 等损伤检验方法. 目前取得了如下的一些共识:

(1) 试验和理论分析都表明, 冲击力和水果的固有频率随成熟度变化, 这些变化的根本原因是水果组织的杨氏模量的改变.

(2) 冲击力和冲击引起的振动的固有频率是有潜力成为无损、在线检测的两个基本物理量.

(3) 冲击力和水果的固有频率这些参数与 M-T 试验结果不完全相同, 这是两种不同的检验手段, 因此这两者的相关系数不高是必然的.

值得深入研究的一些问题:

(1) 水果等生物材料的基本力学特性和本构关系的系统研究. 这些研究应该从细观的角度更深入的探讨. 这些基本性质对进一步理解和分析试验结果和进行数值模拟都是非常必要的. 并且, 水果等生物材料的基本性质随品种和生长地域不同而异, 因此, 国外的研究数据不一定能用于我国.

(2) 将水果视为粘弹性、非线性材料, 它跌落时与刚性平面冲击的动力学特性的理论和试验研究. 这些研究对揭示冲击力的特性、冲击力与水果组织特性的关系规律都是必要的.

(3) 水果组织材料特性的时变规律研究, 目前试验数据分散和差异很可能是与对这一规律缺乏认识有关系.

(4) 简便的在线测量、分析方法的研究, 开发相应的测试设备, 使之实用化.

## 参 考 文 献

- 1 Dull G G, et al. Near infrared analysis of soluble solid in intact cantaloupe. *J Food Science*, 1989, 54: 393~395
- 2 Dull G G, et al. Instrument for nondestructive measurement of soluble solids in honeydew melon. *Trans ASAE*, 1992, 35: 735~737
- 3 Mohsenin N N. *Physical Properties of Plant and Animal Material*. 3rd Edition. New York: Gordon and Breach Science Publisher, 1980. 181~190
- 4 赵学笃等. 农业物科学. 北京: 机械工业出版社, 1987. 220~280
- 5 孙之源等. 农业生物力学及农业生物电磁学. 北京: 中国农业出版社, 1996. 248~296
- 6 李里特. 食品物科学. 北京: 中国农业出版社, 1998. 181~186
- 7 Magness J R, et al. An improved type of pressure tester for determination of fruit maturity. Washington D C: USDA Circular. 1925 (350)
- 8 Rehkugler G E, et al. Image processing algorithm for apple defect detection. *Trans ASAE*, 1989, 32: 267~272
- 9 Paulus I, et al. Using of image analysis to investigate human quality classification apples. *J Agri Eng Res*, 1997, 68: 341~353
- 10 Chen P, Fridley R B. Analytical method for determining viscoelastic constants of agricultural products. *Trans ASAE*, 1972, 15(6): 1103~1106
- 11 Abbott J A, Lu R. Anisotropic mechanical properties of apples. *Trans ASAE*, 1996, 39(4): 1451~1459
- 12 Chen H, De Baerdemaeker J. Modal analysis of the dynamic behavior of pineapples and its relation to fruit firmness. *Trans ASAE*, 1993, 36(5): 1439~1444
- 13 Cooke J R, Rand R H. A mathematical study of resonance in intact fruits and vegetables using a 3-media alastica sphere model. *J Agri Res*, 1973, 18: 141~157
- 14 Chappell T W, et al. Poisson's ratio and Young's modulus for apple flesh under compressive loading. *Trans ASAE*, 1968, 11(5): 608~610
- 15 Hammerle J R, et al. The determination of Poisson's ration by compression tests of cylindrical specimens. *J of Texture Studies*, 1971, 2: 31~49
- 16 Bourne M C. *Food Texture and Viscosity*. New York: Academic Press, 1982. 325~336
- 17 Chen P, et al. Factors affecting acoustic response of apples. *Trans ASAE*, 1992, 35(6): 1915~1920

- 18 Clark R L, et al. Resonance and optical properties of peaches as related to flesh firmness. *Trans ASAE*, 1973, 16(6): 1140~1142
- 19 Garrett R E, et al. Velocity of sonic pulses in apples. *Trans ASAE*, 1972, 15(4): 770~774
- 20 Duprat F, et al. The acoustic impulse response method for measuring the overall firmness of fruit. *J Agri Eng Res*, 1997, 66: 251~259
- 21 Yamamoto H, et al. Acoustic impulse response method for measuring natural frequency of intact fruits and preliminary applications to internal quality evaluations of apples and watermelons. *J of Texture Studies*, 1980, 11: 117~136
- 22 De Baerdemaeker J. The use of mechanical response measurements to determine fruit texture. *Acta Horticulture*, 1989, 258: 331~339
- 23 Zhang X, et al. Peach firmness determination by puncture resistance, drop impact, and sonic impulse. *Trans ASAE*, 1994, 37(2): 495~500
- 24 Maness N O, et al. Internal variation in peach fruit firmness. *Hort Sci*, 1992, 27(5): 903~905
- 25 Delwiche M J. An impact force response fruit firmness sorter. *Trans ASAE*, 1989, 32(1): 186~188
- 26 Lichtensteiger M J, et al. Impact parameters of spherical viscoelastic objects and tomatoes. *Trans ASAE*, 1988, 31(2): 595~602
- 27 Nicolas J, et al. Effects of different conditions of cool storage upon physicochemical changes of kiwifruit. *Acta Horticulture*, 1986, 194: 261~272
- 28 Peleg K, Hinga S. Firmness indexes of viscoelastic bodies by vibration testing. *J Rheol*, 1989, 33(4): 639~657
- 29 Van Woensel, et al. Measuring the mechanical properties of apple tissue using modal analysis. *J of Food Proc Eng*, 1988, 10: 151~163
- 30 Kanwano S, et al. Determination of sugar content in intact peaches by near infrared spectroscopy with fiber optics interactance mode. *J Japanese Soc of Hort Science*, 1992, 62: 445~451
- 31 Finney E E. Dynamic elastic properties and sensory quality of apple fruit. *J of Texture Studies*, 1971, 2: 62~74
- 32 Franke J E, Rohrbach R P. A nonlinear impact model for a sphere with a flat plate. *Trans ASAE*, 1981, 24(6): 1683~1686
- 33 Perry H, et al. Mechanical properties of peach under impact loading. *Trans ASAE*, 1965, 18(2): 191~193
- 34 Baerdemaeker D, et al. Quality detection by frequency spectrum analysis of the fruit impact force. *Trans ASAE*, 1982, 25(1): 175~178
- 35 Rohrbach, et al. A firmness sorting criterion for blueberries. *Trans ASAE*, 1982, 25(2): 261~265
- 36 Delwiche M J, et al. Determination of peach firmness by analysis of impact forces. *Trans ASAE*, 1987, 30(2): 249~254
- 37 Nahir D Z, et al. Tomatoes grading by impact force response. ASAE Paper. No 86-3028. 1986
- 38 Stephenson K Q, et al. Vibrational response properties as sorting criteria for tomatoes. *Trans ASAE*, 1973, 16(6): 258~265
- 39 Delwiche M J, et al. A probe impact sensor for fruit firmness measurement. *Trans ASAE*, 1991, 34(1): 187~192
- 40 Cooke J. An interpretation of the resonant behavior of intact fruits and vegetables. *Trans ASAE*, 1972, 15(2): 1075~1080
- 41 Armstrong P, et al. Impulsive excitation of acoustic vibrations in apples for firmness determination. *Trans ASAE*, 1990, 33(4): 1353~1358
- 42 Armstrong P, et al. Peach firmness determination using two different nondestructive vibrational sensing instruments. *Trans ASAE*, 1997, 40(3): 699~703
- 43 Farabee P, et al. Determination of watermelon maturity with sonic impulse testing. ASAE Paper No 91-3013, 1991
- 44 Shmulevich I, et al. Detection of fruit firmness by frequency analysis. *Trans ASAE*, 1996, 39(3): 1047~1055
- 45 Finney Jr. An objective evaluation of changes in firmness of ripening banana using a sonic technique. *J Food Sci*, 1967, 32(6): 642~646
- 46 Abbott J A, et al. Sonic techniques for measuring texture of fruit and vegetables. *Food Technol*, 1968, 22(5): 101~112
- 47 Abbott J A, et al. Acoustic vibration for detecting textural quality of apples. *Am Soc for Hort Sci*, 1968, 93: 725~737
- 48 Abbott J A, et al. Relationship of sonic resonant frequency to compression tests and Magness-Taylor firmness of apples during refrigerated storage. *Trans ASAE*, 1994, 37(4): 1211~1215
- 49 Louis A, et al. Changes in sonic resonance of 'delicious' and 'golden delicious' apples undergoing accelerated ripening. *Trans ASAE*, 1994, 37(3): 907~912
- 50 Abbott J A, et al. Nondestructive sonic firmness measurement of apples. *Trans ASAE*, 1995, 38(5): 1461~1466
- 51 王书茂等. 西瓜成熟度无损检验的冲击振动方法. *农业工程学报*, 1999, 15(3)
- 52 何东健等. 西瓜打击音波特性的研究. *西北农业大学学报*, 1994, 22(3): 105~107
- 53 Rosenfeld D I, et al. Three dimensional simulation of acoustic response of fruit for firmness sorting. ASAE Paper No 91-6046. 1991

- 54 Rosenfeld D I, et al. Three dimensional simulation of the dynamic response of fruit. *ASAE Paper No 93-6022*. 1993
- 55 Kimmel E, et al. Vibration modes of spheroidal fruits. *J Agri Eng Res*, 1992, 52: 201~213
- 56 Chen P, et al. Maturity evaluation of avocados by NMR methods. *J Agric Eng Res*, 1993, 55(3): 177~187
- 57 Chen H. De baerdemaeker J. Finite element based modal analysis of fruit firmness. *Trans ASAE*, 1993, 36(4): 1827~1833

## ON THE STUDY OF THE FRUIT FIRMNESS EVALUATION BY DYNAMIC TECHNIQUES

Jiao Qunying      Wang Shumao

Department of Engineering Sciences, China Agriculture University, Beijing 100080, China

**Abstract** In recent years, scientists of developed countries have paid a great attention on the fruit firmness evaluation by means of non-destructive techniques. The fruit firmness is an important factor for the fruit ripeness and quality, and is also very useful in its planting and storing management. This paper gives a review of studies on evaluating fruit firmness by dynamic techniques. In this paper, the method used for non-destructive detection and the relationship between resonant frequencies and firmness are summarized.

**Keywords** fruit firmness, fruit natural frequency, fruit response, non-destructive evaluation